

1. 横変位摩擦ダンパーの終局耐力試験

Final Strength Test of Friction Damper for Lateral Displacement

山崎 彬* 波田雅也* 木村浩之* 下村将之*

—概要—

筆者らは、橋梁の固定条件の支承部にダイス・ロッド式摩擦ダンパーを設置することで、常時やレベル1地震時には固定装置として桁ずれを防ぎ、レベル2地震時には制震装置として橋脚基部の応答低減を図る耐震性向上技術を開発し実用化している。現在は、橋軸方向を可動条件とする支承部の橋軸直角方向に適用可能な「横変位摩擦ダンパー」の開発を進めている（写真1、図1、図2）。

本報は、横変位摩擦ダンパーの終局耐力の確認および耐力階層の計算結果と実際の破壊モードとの比較検討を目的として実施した終局耐力試験の概要と結果について報告する（図3、写真2）。

—技術的な特長—

横変位摩擦ダンパーは、ロッドの両端にスライド材を配して上部構造の桁付きブラケットで挟み込む機構としており、橋軸方向の挙動に極力干渉することなく、橋軸直角方向の荷重が適切に作用する（図1、図2）。横変位摩擦ダンパーは完全剛塑性に近い履歴特性を利用し、橋軸直角方向に作用する地震動の大きさに応じて3段階の機能（固定装置→制震装置→横変位拘束構造）を発揮する。

試験の結果、横変位摩擦ダンパーは摩擦荷重500kNの3倍（1500kN）まで設計した耐力階層通りに挙動し、最終的に6倍以上の終局耐力を発揮した。また、終局耐力を一度経験した後、さらに逆方向に载荷を続けた場合も、変わらず制震装置として機能したのち高い耐力を発揮した（図3）。

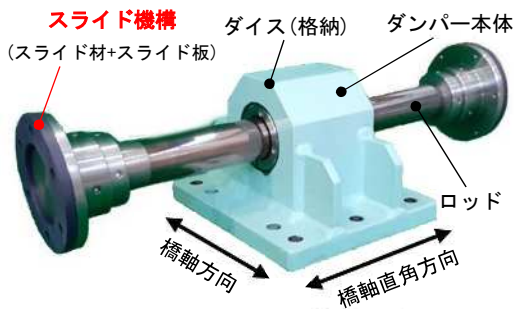


写真1 横変位摩擦ダンパー

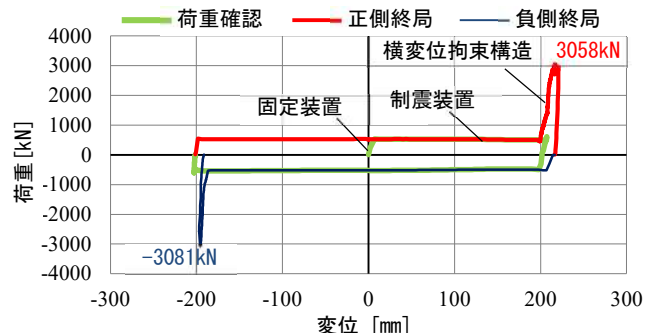


図3 試験結果（荷重-変位関係）

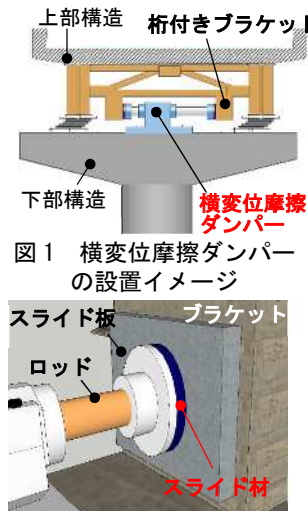


図1 横変位摩擦ダンパーの設置イメージ

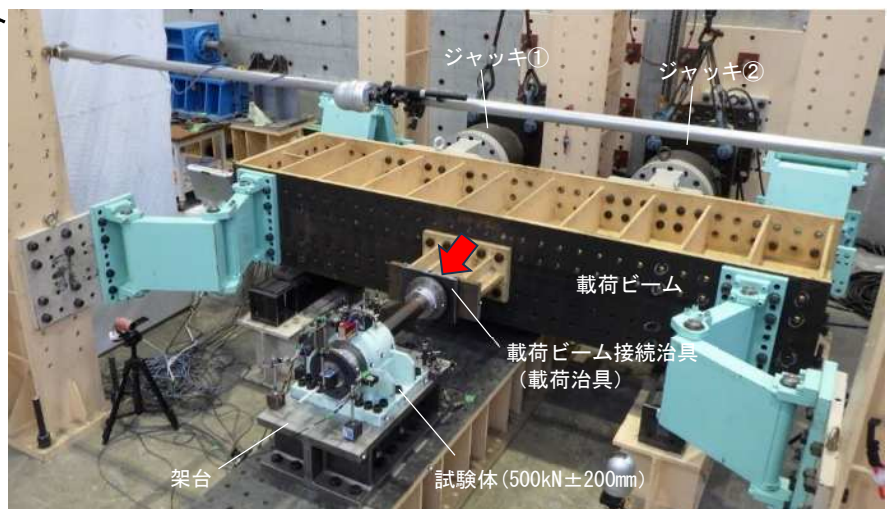


写真2 終局耐力試験の実施状況

※本研究は、（一財）首都高速道路技術センターと青木あすなる建設(株)との共同研究成果の一部である。

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

横変位摩擦ダンパーの終局耐力試験

Final Strength Test of Friction Damper for Lateral Displacement

○山崎 彬* 波田 雅也* 木村 浩之* 下村 将之*

Akira YAMASAKI Masaya HADA Hiroyuki KIMURA Masayuki SHITAMURA

ABSTRACT Authors have put into practical use a seismic retrofitting technology that installs friction dampers on bridge bearings. We are also developing a "lateral displacement friction damper" in which the friction damper functions as a damping device in the direction perpendicular to the bridge axis, regardless of the movement of the superstructure in the bridge axis direction. In this report, an ultimate strength test was conducted to verify the function of the lateral displacement suppression structure of the lateral displacement friction damper. The test results confirmed that the lateral displacement friction damper exhibited a maximum yield strength that was more than six times the standard value, and had the function of a lateral displacement suppressing structure.

Keywords : 摩擦ダンパー, ダイス・ロッド式, 橋梁, 制震, 終局耐力試験

Friction Damper, Die and Rod Type, Bridge, Seismic Control, Final Strength Test

1. はじめに

筆者らは、「ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(以下、DRF ダンパー)」を橋梁の支承部に設置することで、常時や L1 地震時には桁ずれを防止する固定装置として機能し、L2 地震時には履歴減衰による制震効果を発揮し橋脚の応答低減を図る耐震性向上技術を開発し実用化している^{2),3)}。

DRF ダンパーは、上部構造と下部構造を両端ピン接合で緊結する。橋軸方向を可動条件とする支承部の橋軸直角方向に設置する場合、図 1(a)のように上部構造が橋軸方向に大きく変位すると、DRF ダンパーが斜めに傾く。傾くことでダンパー荷重の作用軸が変化し、橋軸直角方向に作用する荷重が橋軸方向にも分散するため、上部構造の橋軸方向への挙動に干渉する懸念がある。そこで、図 1(b)のように両端を上下部構造にピン接続せず、スライド機構を配した構造とすることで、上部構造の橋軸方向への挙動に極力干渉することなく、橋軸直角方向の荷重が適切に作用する「横変位摩擦ダンパー(以下、横変位ダンパー)」を考案した⁴⁾。

2022 年 6 月に実大 500kN 級の横変位ダンパー

に対する大型振動台実験を行った(写真 1)。実験の結果、横変位ダンパーは 3 次元の動的加振において求められる機能を発揮し、実用化の目途が立った⁵⁾⁻⁹⁾。大型振動台実験では 2.2 節で後述する「ストロークエンドに到達すると、“制震装置”から“横変位拘束構造”に切り替わる」という機能が動的加振によって実証することができたが、

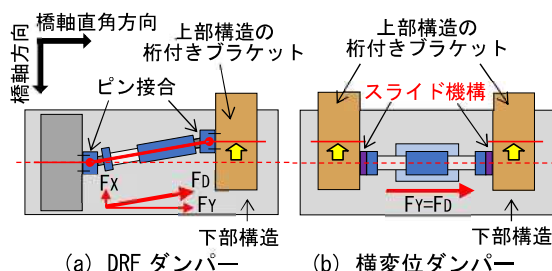


図 1 橋軸方向変位に対する各ダンパーの挙動の違い

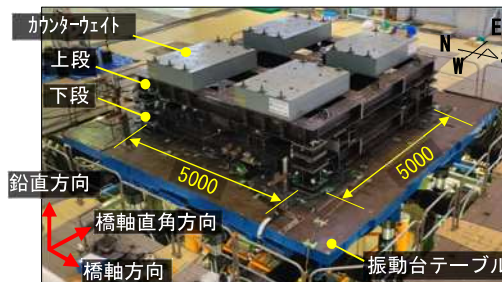


写真 1 振動台実験の状況(全景)
於：国立研究開発法人土木研究所(2022 年 6 月)

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

横変位拘束構造としての終局耐力の確認には至っていない。

本報では、横変位拘束構造としての終局耐力の確認および耐力階層の計算結果と実際の破壊モードとの比較検討を目的として実施した終局耐力試験の概要と試験結果について報告する。

2. 横変位ダンパー

2.1 設置と摩擦機構

横変位ダンパーは、図2(a)に示すように、上部構造に接続された桁付きブラケットで挟み込む形で橋梁の支承部に設置される。ブラケットにスライド板を、横変位ダンパーの両端にスライド材を設けることで、両者の接触部は低摩擦で摺動し、上部構造の橋軸方向への変位に極力干渉しない。

横変位ダンパーの摩擦機構は、DRFダンパーと同様で、写真2に示す鋼製の環状のダイスと銅合金製の棒状のロッドで構成される。ダイスの内径より少し太いロッドをダイスに嵌め込むことで、ロッドの外周に締付け力が常に生じる。上部構造の変位によりダイス・ロッド間が摺動すると、ダ

イスとロッドの接触面に摩擦力が発生する。

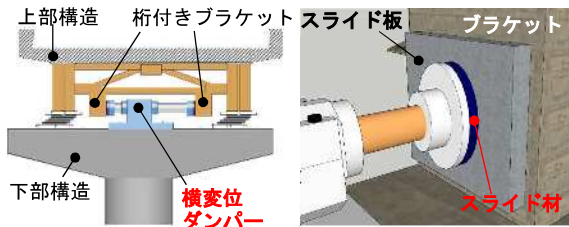
2.2 横変位ダンパーの機能

横変位ダンパーは、橋軸直角方向に作用する地震動の大きさに応じて3段階の機能を発揮する(図3)。常時やL1地震時には、静止摩擦力によりダイス・ロッド間は摺動せず、①固定装置の役割を果たす。L2地震時には、上部構造慣性力がダイス・ロッド間の最大静止摩擦力に達してロッドが一定の動摩擦力で摺動し、②制震装置としてエネルギー吸収する。さらに、設計地震動を上回る地震動が作用し、ストロークエンドに達した場合は、③横変位拘束構造として機能する。

3. 試験概要

3.1 試験体

終局耐力試験に用いた横変位ダンパーは、大型振動台実験で用いた摩擦荷重500kN、ストローク±200mmと同じとし、試験は固定タイプとボールタイプ1基づつ実施した(図4、写真3)。固定タイプは、ダイスとロッドをダンパー本体に直に固定するシンプルな機構で、ボールタイプは、上



(a) 設置箇所(橋梁全景) (b) スライド機構の拡大
図2 横変位ダンパーの設置イメージ

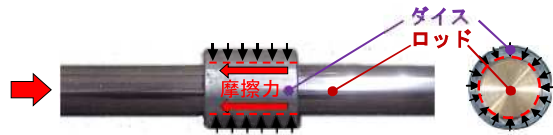


写真2 横変位ダンパーの摩擦機構

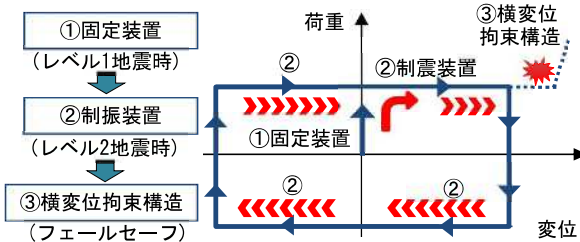
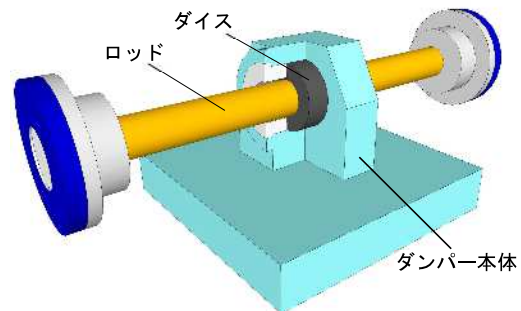
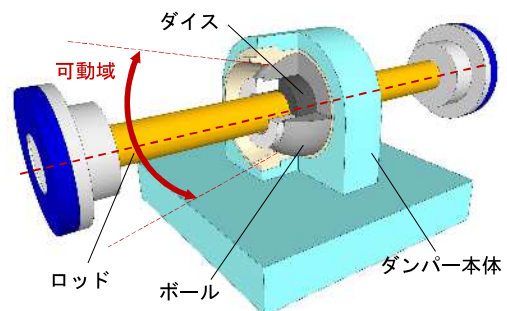


図3 橋軸直角方向に対する3段階の機能



(a) 固定タイプ



(b) ボールタイプ

図4 試験体 (500kN±200mm)

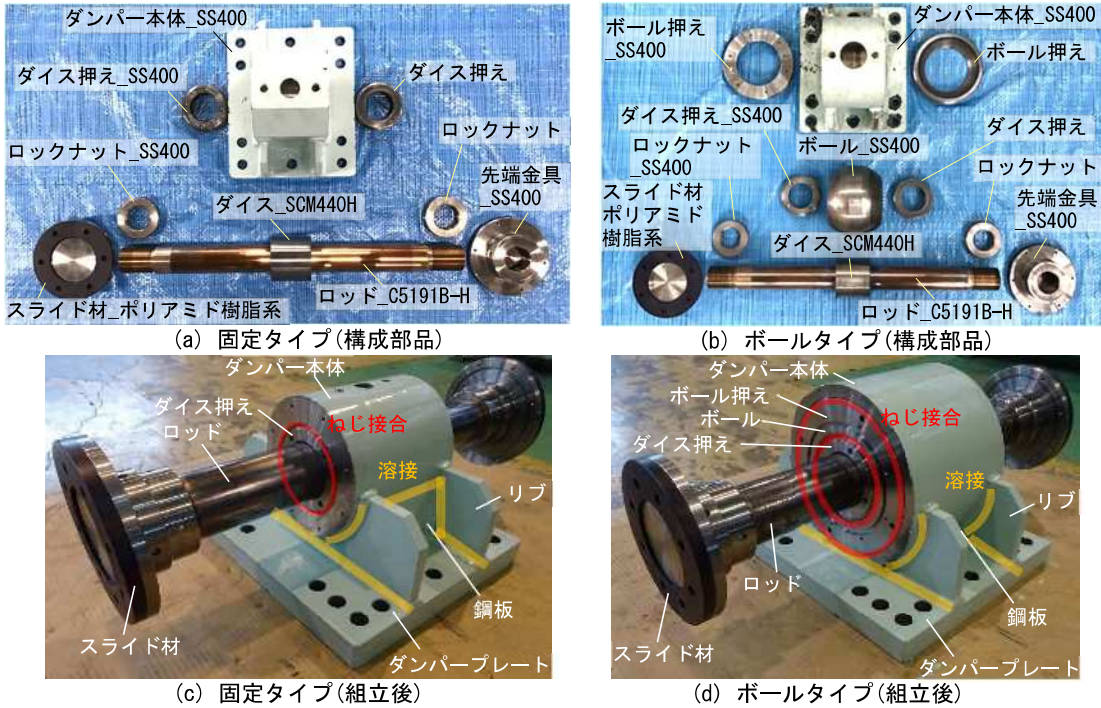


写真3 試験体 (500kN±200mm)

部構造の回転挙動に追随するようボール(球体)を内蔵した構造である。固定タイプは、写真3(a)に示す7つの部品で構成され、ダイスがダンパー本体に2つのダイス押えで固定される構造である。ダイス押えはダンパー本体にねじ接合され、ダンパー本体はダンパープレートにリブや鋼板を介して溶接で固定される。

ボールタイプは、写真3(b)に示す9つの部品で構成され、ダイス押えでダイスをボールに固定し、そのボールをボール押えでダンパー本体に格納する構造である。ダイス押えはボールに、ボール押えはダンパー本体にねじ接合されるが、ボールはダンパー本体の内部で回転できる仕様で格納

される。ダンパー本体はダンパープレートに少し埋め込まれた状態で周囲およびリブを介して溶接で固定される。

3.2 試験方法

試験は当社が保有する大型ジャッキシステムを用いて実施した(写真4)。2基のジャッキを水平方向に配置し、載荷ビームを介して試験体を押すことで水平力を与えた。なお、初めに載荷した向きを正側とし、逆方向(負側)は架台ごと試験体を180度回転させて載荷した。

3.3 計測計画

写真5に計測状況を示す。計測項目は荷重、変位とし、荷重はジャッキ内部のロードセルの値で

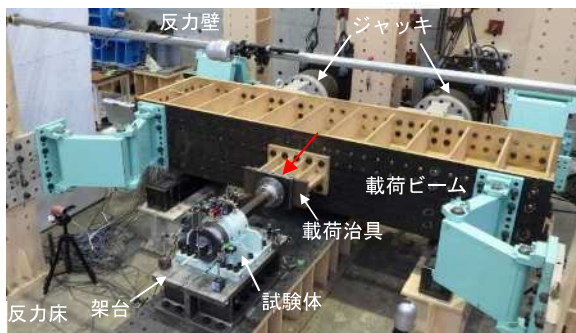


写真4 試験状況(全景)

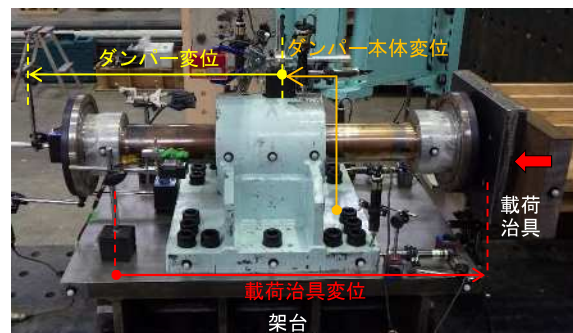


写真5 計測状況

ある。変位は高感度変位計、レーザー式変位計で計測した。ここで、水平荷重は2基のジャッキの合計値を、ダンパー変位はダンパー本体から先端金具の相対変位を、ダンパー本体変位はダンパープレートに対するダンパー本体上部の相対変位を、載荷治具変位は架台と載荷治具の相対変位を示す。

3.4 耐力階層の算出

横位拘束構造として機能するために必要な条件^{1),2)}は、摩擦荷重 500kN に対して 1.5~3 倍 (750kN~1500kN) の荷重が作用したときに、ストロークエンド到達後の横変位ダンパーの変形が弾性域に留まることと想定される。したがって、今回の試験に用いた横変位ダンパーも摩擦荷重 500kN の3倍である 1500kN に対し、横変位ダンパーの変形が弾性域に留まるよう設計した。表1に耐力階層の算出結果を、図5に該当する算出箇所を示す。算出の結果、両タイプともに降伏耐力 P_y が最小となる算出箇所は a)ダンパー本体のせん断変形であった。摩擦荷重 500kN に対して

固定タイプの降伏耐力は 3.1 倍(1550kN)、ボールタイプの降伏耐力は 3.2 倍(1580kN)で、横変位拘束構造として求められる条件を満足している。また、終局耐力 P_u が最小となる算出箇所は、固定タイプは a)ダンパー本体のせん断変形で、摩擦荷重 500kN に対して 6.3 倍(3169kN)であった。一方、ボールタイプの算出箇所は b)ボール押えのネジ部のせん断破壊で、6.4 倍(3196kN)の耐力値であった。

4. 試験結果(固定タイプ)

4.1 荷重確認試験

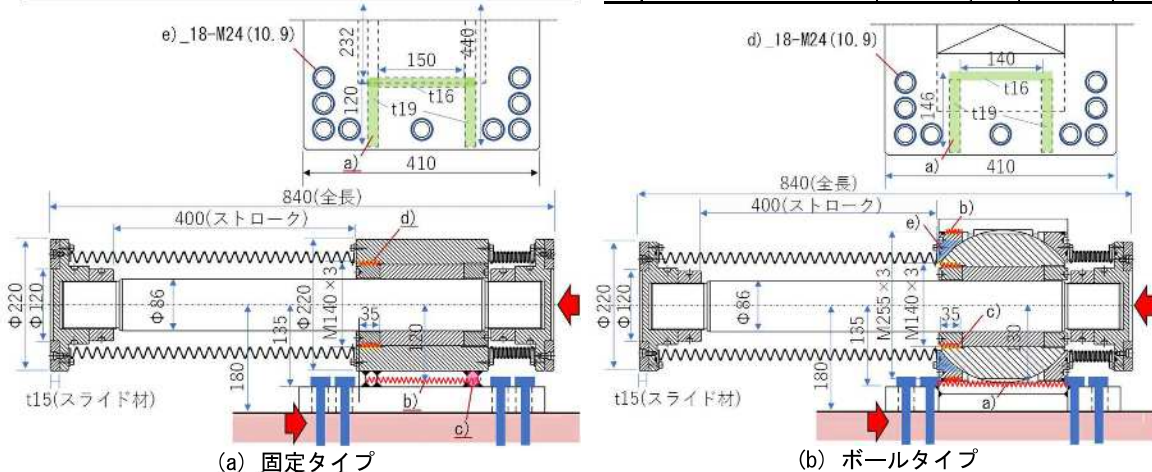
試験体の平均摩擦荷重²⁾と最大ストロークを確認した。確認結果を表2に、水平荷重とダンパー変位の関係を図6に示す。表2、図6より、平均摩擦荷重は 516kN 程度で、摩擦荷重 500kN に対し+5%以内であった。

4.2 正側の終局耐力試験

正側の終局耐力試験の結果、破壊モードはダンパー本体のせん断変形(算出結果 a))であった(写

表1 耐力階層の算出結果

(a) 固定タイプ					(b) ボールタイプ				
算出箇所	降伏耐力 P_y [kN]	P_y / P_0	最大耐力 P_u [kN]	P_u / P_0	算出箇所	降伏耐力 P_y [kN]	P_y / P_0	最大耐力 P_u [kN]	P_u / P_0
a) ダンパー本体(せん断)	1549.9	3.1	3168.8	6.3	a) ダンパー本体(せん断)	1688.0	3.4	3472.9	6.9
b) 溶接部(せん断)	2196.6	4.4	3738.9	7.5	b) ボール押えねじ部(せん断)	1878.0	3.8	3196.0	6.4
c) 溶接部(浮き上がり)	2561.7	5.1	4360.3	8.7	c) ダイス押えネジ部(せん断)	2883.3	5.8	4907.8	9.8
d) ダイス押えネジ部(せん断)	2883.3	5.8	4907.8	9.8	d) 取付ボルト(せん断負担)	3431.2	6.9	3812.4	7.6
e) 取付ボルト(せん断負担)	3431.2	6.9	3812.4	7.6	e) ボール押え-ボール(圧縮)	9332.0	18.7	11346.0	22.7



※鋼材 (SS400) の強度の特性値は道路橋示方書¹⁾に記載の値を用いた。

図5 耐力の算出箇所

真6)。図7に水平荷重とせん断変形したダンパー本体変位の関係を示す。図7より、ストロークエンド到達後、摩擦荷重 500kN の3倍(1500kN)まではダンパー本体のせん断変形が弾性変形であり、計算結果と実験結果との整合性が取れていることが確認された。終局耐力の結果を表3に、水平荷重と載荷治具変位の関係を図8に示す。なお、表3、図8には4.3節で後述する負側の終局耐力

の結果もまとめて示す。表3、図8より、正側の終局耐力は3058kNで摩擦荷重500kNの6.1倍の高い耐力を発揮した。

4.3 負側の終局耐力試験

負側の破壊モードは、ダンパー本体とダンパープレートの溶接部付近に亀裂が生じた破壊であった(写真7)。表3、図8より、負側における終局耐力は-3083kNで、摩擦荷重500kNの6.2倍の

表2 荷重確認結果(固定タイプ)

加振名	ダンパー変位[mm]		水平荷重[kN]		エネルギー吸収量 ²⁾ [kJ・m]		平均摩擦荷重[kN]	
	MAX	MIN	MAX	MIN	A1	A2	A1	A2
荷重確認	201.7	-199.0	608.4	-607.4	104	206	516	515

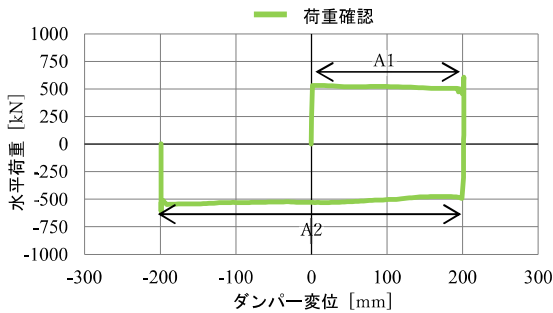


図6 水平荷重-ダンパー変位関係(固定タイプ)

表3 終局耐力確認結果(固定タイプ)

	最大荷重 P_{max} [kN]	P_{max}/P_0	P_{max}/P_u	破壊モード
正側終局	3058.3	6.1	0.97	ダンパー本体のせん断変形
負側終局	-3080.5	6.2	0.97	ダンパー本体のせん断変形からダンパー本体に亀裂
正側/負側	0.99	0.99	0.99	

※ P_0 :摩擦荷重 500kN、 P_u :最大耐力(計算値)3168kN

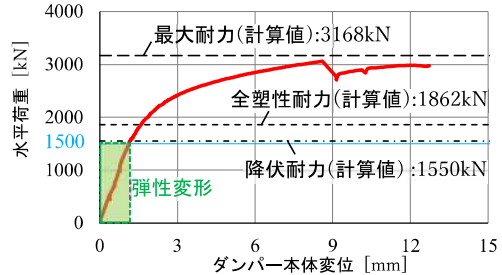


図7 水平荷重-ダンパー本体変位関係(固定タイプ_正側)

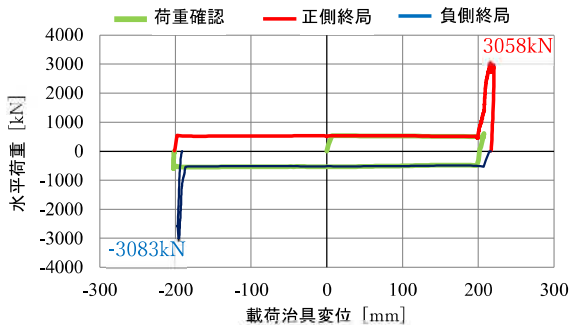


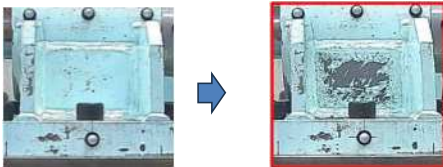
図8 水平荷重-載荷治具変位関係(固定タイプ)



(a) 試験体全景



(a) 試験体全景



(b) ダンパー本体(載荷前) (c) ダンパー本体(載荷後)
写真6 最大荷重時の試験体(固定タイプ_正側)



(b) ダンパー本体 (c) 亀裂発生部拡大
写真7 載荷後の試験体(固定タイプ_負側)

高い耐力を発揮した。また、正側の終局耐力の載荷前後で平均摩擦荷重は変わらずに摺動しており、一度終局耐力を経験した後も制震装置として機能することが確認された。

5. 試験結果（ボールタイプ）

5.1 荷重確認試験

試験体の平均摩擦荷重と最大ストロークを確認した。確認結果を表4に、水平荷重とダンパー変位の関係を図9に示す。表4、図9より平均摩擦荷重は521kN~545kNで摩擦荷重500kNに対し少し高かったが+10%以内に収まっている。

表4 荷重確認結果(ボール_荷重確認)

加振名	ダンパー変位[mm]		水平荷重[kN]		エネルギー吸収量 ²⁾ [kN・m]		平均摩擦荷重[kN]	
	MAX	MIN	MAX	MIN	A1	A2	A1	A2
荷重確認	200.9	-205.3	621.9	-623.5	105	221	521	545

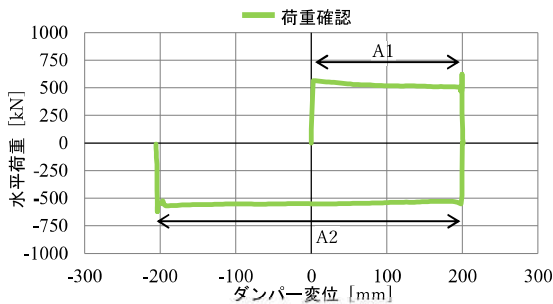


図9 水平荷重-ダンパー変位関係(ボールタイプ)

表5 終局耐力確認結果(ボールタイプ)

	最大荷重 P_{max} [kN]	P_{max} / P_D	P_{max} / P_U	破壊モード
正側終局	3120.6	6.2	0.98	ダンパー本体のせん断変形
負側終局	-1897.8	3.8	0.59	ダンパー本体のせん断変形からダイス押え抜き
正側/負側	1.64	1.64	1.64	

※ P_D : 摩擦荷重 500kN、 P_U : 最大耐力(計算値)3197kN



(a) 試験体全景

5.2 正側の終局耐力試験

正側の終局耐力試験の結果、破壊モードは固定タイプと同様、ダンパー本体のせん断変形(計算結果 a)であった(写真8)。図10に水平荷重とせん断変形したダンパー本体変位の関係を示す。図10より、ストロークエンド到達後、摩擦荷重500kNの3倍(1500kN)まではダンパー本体のせん断変形が弾性変形であり、計算結果と実験結果との整合性が取れていることが確認された。終局耐力の結果を表5に、水平荷重と載荷治具変位の関係を図11に示す。なお、表5、図11には5.3節で後述する負側の終局耐力の結果もまとめて

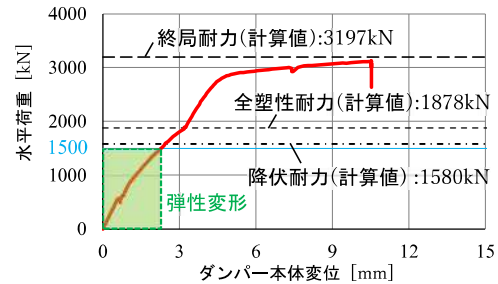


図10 水平荷重-ダンパー本体変位関係(ボールタイプ_正側)

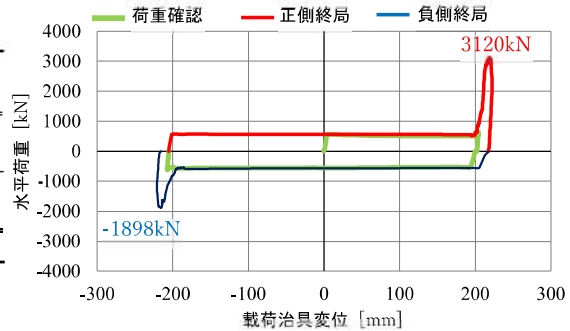
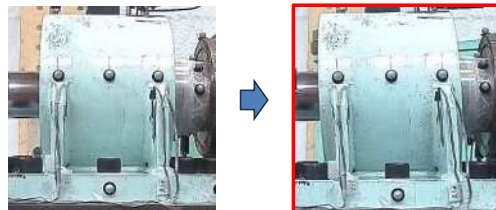
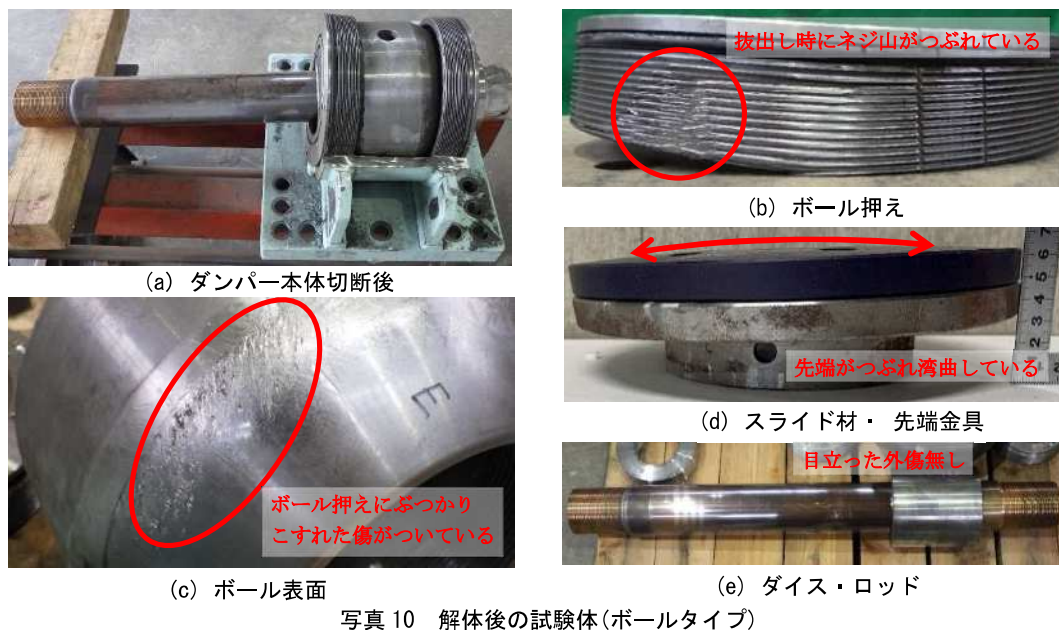
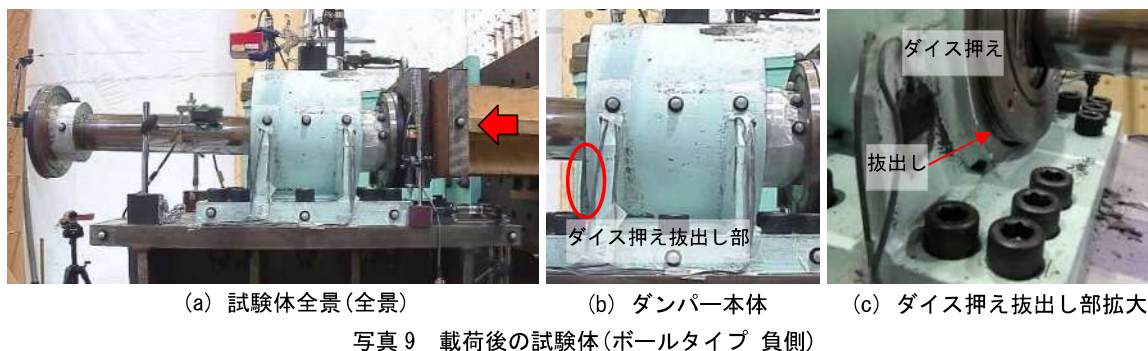


図11 水平荷重-載荷治具変位関係(ボールタイプ)



(b) ダンパー本体(載荷前) (c) ダンパー本体(載荷後)

写真8 最大荷重時の試験体(ボールタイプ_正側)



示す。表5、図11より、正側の終局耐力は3121kNで摩擦荷重500kNの6.1倍の高い耐力を発揮した。

5.3 負側の終局耐力試験

負側の破壊モードはダンパー本体のせん断変形に伴いボール押えが塑性変形(折れ曲がり)し、最終的にダンパー本体からボール押えが抜け出る破壊モードであった(写真9)。表5、図11より、負側における終局耐力は1898kNで、摩擦荷重500kNの3.8倍であった。また、固定タイプと同様、静側の終局耐力の载荷前後で平均摩擦荷重は変わらずに摺動しており、一度終局耐力を経験した後も制震装置として機能することが確認された。

5.4 試験後の試験体

負側の終局耐力を確認したのち、試験体を解体

し各部品の損傷状況を確認した。確認結果を写真10に示す。写真10(b)より、抜け出したボール押えが変形していることがわかる。また、ボールにはボール押えとこすれた跡があった(写真10(c))。ダンパー両端に設けられたスライド材及び先端金具は、载荷によって変形していることが確認された(写真10(d))。一方、ダイス・ロッドには大きな損傷は確認されなかった(写真10(e))。

6. まとめ

本報では、横変位摩擦ダンパーの終局耐力の確認および耐力階層の計算結果と実際の破壊モードとの比較検討を目的として実施した終局耐力試験の概要と結果について報告した。

得られた結果を次頁に示す。

- (1) 固定タイプ、ボールタイプともに、摩擦荷重 500kN の 3 倍の荷重(1500kN)に対し、ストロークエンド到達後の横変位ダンパーの変形が弾性範囲内に収まり、設計した耐力階層の計算結果と整合性が取れていた。
- (2) 固定タイプ、ボールタイプともに、摩擦荷重 500kN に対し 6 倍以上の終局耐力を発揮した。
- (3) 固定タイプ、ボールタイプともに、一度終局耐力を経験し塑性変形が生じた後、逆方向に载荷を続けた場合も、塑性変形前と変わらずに制震装置として機能したのち高い耐力を発揮した。
- 角方向に適用する「横変位摩擦ダンパー」の開発、土木学会第 76 回年次学術講演会、I-157、2019.
- 5) 須田郁慧ほか:損傷制御を目的とした橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験(その 1: 実験概要)、土木学会第 78 回年次学術講演会、CS10-115、2023.
- 6) 波田雅也ほか:損傷制御を目的とした橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験(その 2: 基本特性(正弦波))、土木学会第 78 回年次学術講演会、CS10-116、2023.
- 7) 木村浩之ほか:損傷制御を目的とした橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験(その 3: 基本特性(地震波))、土木学会第 78 回年次学術講演会、CS10-117、2023.

【参考文献】

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V、2017.
- 2) 波田雅也ほか:橋梁の耐震補強に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発、土木学会論文誌 A1、Vol.75、No.2、pp.95-110、2019.
- 3) 波田雅也ほか:摩擦ダンパーを用いた既設橋脚の地震時損傷制御技術の適用、インフラメンテナンス実践研究論文集、Vol.1、No.1、pp.261-268、2022.
- 4) 下村将之ほか:可動支承を有する橋脚の橋軸直
- 8) 山崎 彬ほか:損傷制御を目的とした橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験(その 4: 加振方向数による影響)、土木学会第 78 回年次学術講演会、CS10-118、2023.
- 9) 山本一貴ほか:損傷制御を目的とした橋梁用摩擦ダンパーの大型振動台実験(その 5: 応答低減効果)、土木学会第 78 回年次学術講演会、CS10-119、2023.